

SEGUIMENTO DE CAMINHOS VISUAIS BASEADO EM *NMPC* PARA ROBÔS DIFERENCIAIS

TIAGO T. RIBEIRO*, RAMON O. FERNANDEZ†, ANDRÉ GUSTAVO S. CONCEIÇÃO†

**Departamento de Eletrotécnica
Instituto Federal da Bahia - Campus Feira de Santana
Feira de Santana, Bahia, Brasil*

*†LaR - Laboratório de Robótica
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal da Bahia
Salvador, Bahia, Brasil*

Emails: tiagotrindade@ifba.edu.br, ramon.elt.ba@gmail.com, andre.gustavo@ufba.br

Abstract— This paper proposes a strategy to visual path following based on *NMPC* for differential robots. Simplified visual features are extracted from the path to be followed aiming to generate a regulatory model that enables the calculation of the control actions directly from the image plane. This model is obtained through a *Serret-Frenet* system positioned in the center of camera's field of view and the optimal control actions obtained generate references of speed to the robot wheels. Real results are presented for commercial robot and webcam considering an arbitrary path.

Keywords— Path Following; Visual Control; Predictive Control

Resumo— Este artigo propõe uma estratégia para seguimento de caminhos visuais baseado em *NMPC* para robôs diferenciais. Características visuais simplificadas são extraídas do caminho a ser seguido objetivando a geração de um modelo regulatório que viabiliza o cálculo das ações de controle diretamente do plano da imagem. Tal modelo é obtido através de um sistema de *Serret-Frenet* posicionado no centro campo visual da câmera e as ações de controle ótimas obtidas geram referências de velocidade para as rodas do robô. Resultados reais são apresentados para robô e *webcam* comerciais considerando um caminho arbitrário.

Palavras-chave— Seguimento de Caminho; Controle Visual; Controle Preditivo

1 Introdução

As abordagens tradicionais para seguimento de caminho possuem como premissa a existência de um caminho de referência pré-estabelecido [(Samson and Ait-Abderrahim, 1991), (Soetanto et al., 2003)]. Isto limita bastante a gama de aplicações, visto que, em diversas situações práticas da navegação robótica os ambientes são dinâmicos e não estruturados. A definição prévia de caminhos contemplando este cenário é uma tarefa bastante complexa.

Com a popularização de câmeras de baixo custo e o desenvolvimento de algoritmos eficientes para visão computacional, a utilização de informações visuais viabilizou a inclusão de sensores absolutos de posição, que, em conjunção com outros sensores embarcados, possibilitam a criação de mecanismos eficientes de localização.

Recentemente, grandes esforços têm sido dedicados ao desenvolvimento de estratégias de controle baseadas em visão computacional, especialmente aquelas caracterizadas como controle servo visual, aplicadas tanto para robôs móveis (Mekonnen et al., 2016) quanto para robôs manipuladores (Leite and Lizarralde, 2016).

Dentre as principais técnicas para controle servo visual destacam-se o Controle Visual Baseado em Posição (*PBVS*) e Controle Visual Baseado em Imagem (*IBVS*), sendo esta última mais

eficiente do ponto de vista computacional devido a ausência de algoritmos para a estimação da postura (Chaumette and Hutchinson, 2006). Para ambas as abordagens, a tarefa consiste em posicionar um efetuador final para que uma imagem de referência seja capturada por uma câmera fixada ao robô (ver (Corke, 2011) - Cap 15, para uma completa avaliação).

Especificamente para o seguimento de caminho baseado em imagem, objetiva-se minimizar erros de seguimento obtidos a partir características visuais simplificadas, sendo a lei de controle calculada diretamente do plano da imagem [(Frezza et al., 1997), (Delfín et al., 2014)]. Tal requisito de simplicidade é oriundo da necessidade de manutenção de baixa complexidade computacional, especialmente para dinâmicas rápidas e não lineares.

Em muitos trabalhos, tais características são utilizadas para definição um erro de espaçamento lateral e um erro de orientação relativos a um horizonte frontal ao campo de visão da câmera (Bertozzi et al., 2000). Tais abordagens evidenciam a necessidade de uma caracterização sucinta dos caminhos a serem seguidos, o que implica em restrições na curvatura do caminho, configuração inicial e velocidade de navegação. Em (Cherubini et al., 2008) propõe-se um esquema de controle que contemple estas características, em (de Lima

and Victorino, 2014) são considerados desvios de obstáculos e em (Sabatta, 2014), uma métrica de erro baseada no quadrado da distância entre duas amostras de imagem é proposta. Em ambos os casos, não existe uma caracterização explícita dos limites impostos pelo sistema visual.

O presente artigo utiliza Controle Preditivo Baseado em Modelo Não Linear *NMPC* para o seguimento de caminhos visuais. Tal abordagem consiste na obtenção de um modelo de erros a partir de características visuais simplificadas adquiridas através de um sistema de Serret-Frenet posicionado no centro do campo visual da câmera. Por se tratar de uma estratégia de controle ótima, que leva em consideração as restrições do problema para o cálculo das ações de controle (Allgöwer et al., 2004), objetiva-se adequar os requisitos de navegação supracitados à solução de problemas reais. Para tal fim a técnica proposta é avaliada utilizando um robô diferencial e uma *webcam*, ambos comerciais, e um caminho de referência arbitrário.

Resultados reais demonstram claramente as vantagens da técnica proposta comparativamente às abordagens tradicionais que não levam em consideração os limites físicos do sistema visual para o cálculo das ações de controle, sendo, deste modo, desnecessário considerar qualquer especificação prévia para o caminho.

O artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o modelo do robô diferencial e o problema de seguimento de caminho visual. A estratégia de controle é descrita na Seção 3. Na Seção 4, os resultados reais são apresentados e discutidos. Finalmente, as conclusões são fornecidas na Seção 5.

2 Caracterização do problema

2.1 Robôs móveis diferenciais

Robôs móveis diferenciais com rodas são classificados como robôs não-holonômicos e são bastante

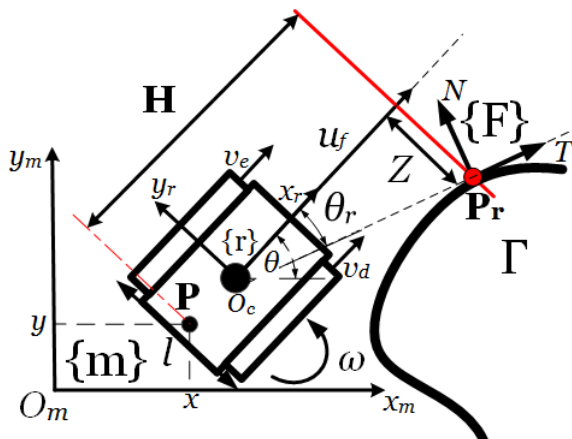


Figura 1: Representação do problema de seguimento de caminho visuais.

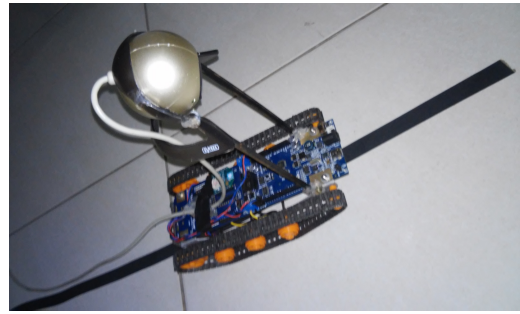


Figura 2: Montagem da *webcam* no robô diferencial.

utilizados em diversas situações, sempre que haja necessidade de um mecanismo cuja descrição dos movimentos seja simplificada. A Figura 1 apresenta os sistemas de coordenadas e os parâmetros utilizados na modelagem destes tipos de robôs.

Utilizando os sistemas de coordenadas ilustrados na Figura 1, obtém-se o seguinte modelo cinemático:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (1)$$

A velocidade linear u_f e a velocidade angular ω , relacionam-se com as velocidades lineares das rodas direita v_d e esquerda v_e da seguinte forma:

$$u_f = \frac{v_d + v_e}{2}; \quad (2)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_e}{l}. \quad (3)$$

Neste trabalho, uma *webcam* comercial de baixa resolução (176 X 144 *pixels*) é instalada no robô com postura de *offset* (relativa ao eixo traseiro) [$x_c = 0,16\text{m}$, $y_c = 0\text{m}$, $z_c = 0,18\text{m}$, $\theta_{c_y} = \frac{\pi}{4}\text{rad}$]. A Figura 2 ilustra a referida instalação.

2.2 Seguimento de caminho visual

Objetivando a utilização de características visuais simplificadas, tendo como requisito a obtenção de baixos níveis de complexidade computacional, utiliza-se a modelagem proposta por (Coulaud et al., 2006). Neste caso, a partir de uma velocidade de navegação u_f , controla-se a orientação do robô para que o caminho a ser seguido permaneça centralizado no campo de visão da câmera.

Esta caracterização do problema de seguimento de caminho visual é particularmente aplicável em situações em que o sensor visual está posicionado de frente para o caminho a ser seguido e com campo de visão limitado.

Define-se *horizonte* como uma linha reta no solo, paralela a eixo traseiro do robô a uma distância H conforme ilustrado na Figura 1. Considere-se o ponto P_r como o ponto de interseção entre o

horizonte e o caminho a ser seguido. Se a curvatura do caminho não é muito elevada, este ponto é único, caso contrário P_r será o ponto mais próximo do eixo longitudinal do robô. Define-se Z como a distância entre P_r e o eixo longitudinal do robô.

Tanto H quanto Z são características cujos parâmetros podem ser facilmente extraídos das imagens, visto que o horizonte corresponde a uma linha de *pixels* a uma distância $d(H)$ do ponto principal enquanto Z é proporcional ao número de pixels entre o centro do horizonte e P_r . A Figura 3 apresenta uma imagem com estas características.

A princípio deve-se considerar que distorções nas imagens podem ser desconsideradas e, como H é constante, para obter Z a partir das imagens, existe um único coeficiente de proporcionalidade obtido na fase de calibração do sistema visual.

Um sistema de Serret-Frenet F é utilizado para caracterizar os movimentos de um veículo virtual posicionado em P_r .

Analisando a Figura 1, obtém-se:

$$P_r(s(t)) = P(t) + H\vec{x}_r(\theta(t)) - Z(t)\vec{y}_r(\theta(t)). \quad (4)$$

Derivando a expressão anterior com relação ao tempo, obtém-se:

$$\dot{s}\vec{T}(s) = \dot{x}\vec{x}_r + H\dot{\theta}\vec{y}_r + Z(t)\dot{\theta}\vec{x}_r - \dot{Z}\vec{y}_r. \quad (5)$$

A relação entre o sistema de coordenadas do robô e o sistema de Serret-Frenet é dada como segue:

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_r \\ \vec{y}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{T} \\ \vec{N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Projetando esta expressão no sistema de Serret-Frenet e substituindo (1) obtém-se:

$$\dot{Z} = \omega H + (\omega Z + u_f) \tan \theta_r; \quad (7)$$

$$\dot{s} = \frac{u_f - \omega Z}{\cos \theta_r}. \quad (8)$$

Visto que $\dot{\theta}_r = \omega - \dot{s}c(s)$, tem-se:

$$\dot{Z} = \omega H + (\omega Z + u_f) \tan(\theta_r); \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega - c(s) \frac{(u_f - \omega Z)}{\cos \theta_r}, \quad (10)$$

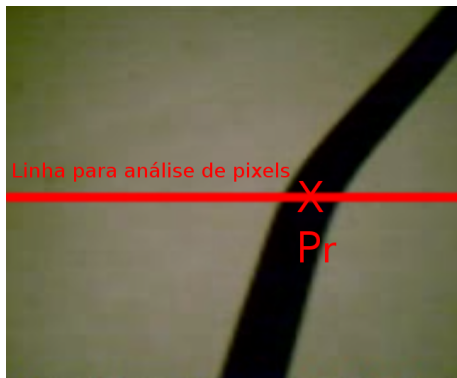


Figura 3: Imagem do caminho a ser seguido.

com $c(s)$ satisfazendo:

$$\dot{c} = \frac{dc}{ds} \frac{(u_f - \omega Z)}{\cos \theta_r}. \quad (11)$$

Para $\dot{Z} = \dot{\theta}_r = 0$ tem-se os seguintes valores de ω :

$$\omega = \frac{cu_f}{\cos \theta_r + cZ}; \quad (12)$$

$$\omega = \frac{u_f \tan \theta_r}{Z \tan \theta_r + H}. \quad (13)$$

Igualando-se (12) a (13), obtém-se:

$$\theta_r = \arcsin(Hc). \quad (14)$$

Deste modo, verifica-se que uma condição de equilíbrio pode ser alcançada apenas com ajustes em θ_r . Objetivando-se formatar o problema de seguimento de caminhos visuais no âmbito de um problema de controle ótimo, define-se $\mathbf{u}_e = \dot{\theta}_r$, como entrada de controle para o *NMPC*. Assim, tem-se o seguinte modelo para o seguimento de caminhos visuais:

$$\mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega H + (\omega Z - u_f) \tan(\theta_r) \\ \mathbf{u}_e \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Considerando que as saídas são os próprios estados, o problema de controlar os movimentos do *i-ésimo* robô, baseando-se em informações visuais, pode ser sumarizado da seguinte forma: Encontrar ω , tal que Z e θ_r sejam factíveis.

A lei de controle proposta por (Coulaud et al., 2006) consiste em encontrar ω proporcional a Z , ou seja, não leva em consideração explicitamente os limites físicos das variáveis de estado.

3 Controlador NMPC

O modelo obtido anteriormente é não linear, variante no tempo e possui restrições nas entradas e nos estados, justificando a utilização de estratégias de controle ótimas.

Dentre as principais vantagens do controle preditivo destacam-se seu desempenho com sistema multivariáveis, sujeitos a restrições e características intrínsecas de robustez, adaptando-se bem a distúrbios, não linearidades e erros de modelagem devido ao esquema de horizonte deslizante. Por isso há a necessidade de desenvolver controladores capazes de considerar explicitamente tais características.

Uma alternativa que vem sendo largamente utilizada em vários ramos do controle automático baseia-se em controladores *NMPC*, que atendem os requisitos mencionados sem um custo computacional proibitivo, na medida em que recursos tecnológicos avançados se tornaram disponíveis.

No controle *NMPC*, a saída do sistema é predita baseada em seus valores atuais e nos modelos. Um perfil de controle em malha aberta é

encontrado através de otimização numérica, aplicando somente o primeiro sinal de controle ao sistema. No próximo instante de amostragem, um novo perfil é obtido considerando as informações mais recentes.

Na abordagem utilizada neste artigo, a entrada a ser aplicada ao robô é dada pela solução, a cada período de amostragem, do seguinte problema de controle ótimo em malha aberta sob um horizonte finito:

$$\min_{\mathbf{u}(\cdot)} \int_t^{t+T_p} F(\mathbf{x}_e(\tau), \mathbf{u}_e(\tau)) d\tau, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a: } \dot{\mathbf{x}}_e(\tau) &= f(\mathbf{x}_e(\tau), \mathbf{u}_e(\tau)) \\ \mathbf{u}_e &\in \mathcal{U} \forall \tau \in [t, t + T_c] \\ \mathbf{x}_e &\in \mathcal{X} \forall \tau \in [t, t + T_p] \end{aligned} \quad (17)$$

com:

$$F(\mathbf{x}_e(\tau), \mathbf{u}_e(\tau)) = \mathbf{x}_e^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_e + \mathbf{u}_e^T \mathbf{R} \mathbf{u}_e,$$

sendo:

T_c : Horizonte de controle;

T_p : Horizonte de predição; com $T_c \leq T_p$;

$\mathbf{Q}, \mathbf{R}$: Matrizes positivas definidas que ponderam os desvios dos valores desejados.

Neste trabalho, $T_p = T_c$ e após a resolução do problema de otimização no instante t_k , as velocidades do centro de massa do robô (u_f, ω), calculadas de $\mathbf{u}_e(t_k)_{\text{ótimo}}$, são utilizadas para cálculo das velocidades das rodas (v_e, v_d) através de (2) e (3). Finalmente, estas velocidades são enviadas para uma malha interna embarcada no robô que implementa a estratégia *PID* clássica para cada roda. Maiores detalhes sobre esta malha interna podem ser obtidos em (Conceicao et al., 2011).

4 Resultados

Para a aquisição de resultados reais o sistema visual foi calibrado considerando os seguintes valores limitantes para os erros de estado (limites do campo visual da câmera): $Z = \pm 0,1m$; $\theta_r = \pm 0,8rad$. Para a resolução do problema de otimização, utiliza-se o pacote de otimização baseado em programação quadrática sequencial *DONLP2* (Spellucci, 1998).

Objetivando-se avaliar o desempenho da técnica proposta em situações em que a curvatura é variável, o caminho arbitrário ilustrado na Figura 4 é especificado.

Considerando as características do robô utilizado (tipo tanque) e do caminho a ser seguido, são adquiridos resultados para $u_f = 0,03m/s$. Os parâmetros de sintonia estão apresentados na Tabela 1.

O limites para as restrições foram definidos como segue:

$$|u_1| \leq 0,2; |Z| \leq 0,05; |\theta_r| \leq 0,3.$$



Figura 4: Caminho arbitrário.

Para um período de amostragem $T_s = 0,5s$ e definindo-se $T_p = T_c = 3$, foram adquiridos os resultados ilustrados na Figura 5.

É possível verificar através da Figura 5(a), que o caminho foi seguido satisfatoriamente¹.

Verifica-se na Figura 5(b) que os tempos de processamento se mantiveram muito inferiores ao período de amostragem. Destes resultados, observa-se também que as restrições das saídas foram plenamente atendidas (5(c)) e os esforços de controle se mantiveram factíveis ao longo do experimento (5(d)).

Nesta etapa, uma breve comparação com a técnica original ($\omega = KZ$) é realizada. Considerando $K = 4$, foram obtidos os resultados ilustrados na Figura 6.

Observa-se que, a despeito do baixo custo computacional, os erros de estado foram elevados, alcançando em determinados instantes valores próximos aos limites definidos pelo campo visual da câmera. Tal situação é confirmada através da Figura 6(c), em torno de 27 segundos, quando o caminho quase saiu do campo visual. Tais resultados ratificam a necessidade da utilização de estratégias de controle ótimas para o seguimento de caminhos visuais.

5 Conclusões

Este trabalho propôs uma estratégia para o seguimento de caminhos visuais baseado em *NMPC* para robôs diferenciais. A modelagem é realizada a partir da extração de características visuais simplificadas e a lei de controle é calculada diretamente do plano da imagem. Para tal fim um sistema de Serret-Frenet é utilizado para representar

¹Este resultado pode ser melhor visualizado através do vídeo disponível em <https://dl.dropboxusercontent.com/u/44421031/rover.mp4>.

Tabela 1: Parâmetros de sintonia.

$\mathbf{Q}_i$	$diag(50;0.5)$
$\mathbf{R}_i$	10

um veículo virtual fixado no centro do campo visual da câmera.

Através de resultados reais foi possível confirmar a aplicabilidade dos controladores *NMPC* para caminhos arbitrários. Para tal fim utilizou-se um caminho com curvatura variável, o que para a maioria das técnicas de seguimento de caminhos visuais, implica diretamente na especificação da velocidade de navegação.

Foi possível confirmar que as restrições definidas pelo campo visual da câmera e pela plataforma experimental foram atendidas satisfatoriamente e com um custo computacional relativamente baixo.

Tal plataforma experimental, feita com elementos comerciais e de baixo custo financeiros, acrescenta maiores atrativos à técnica proposta.

A abordagem original para o modelo em questão foi avaliada, e, além da dificuldade se obter um valor para o único parâmetro de sintonia, apresentou um desempenho inferior à abordagem proposta baseada em *NMPC*.

Apesar da obtenção de uma lei de controle estável, sabe-se que o *NMPC* prático possui restrições nos requisitos de estabilidade o que afeta diretamente a escolha dos horizontes de controle e de predição. Além disso, devido às restrições impostas pela plataforma experimental, a factibilidade recursiva do problema de otimização deve ser formalmente analisada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FUNPED/PRPGI/IFBA, CNPQ e CAPES.

Referências

- Allgöwer, F., Findeisen, R. and Nagy, Z. K. (2004). Nonlinear model predictive control: From theory to application, *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.* **35**(3): 299–315.
- Bertozzi, M., Broggi, A. and Fascioli, A. (2000). Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives, *Robotics and Autonomous Systems* **32**(1): 1 – 16.
- Chaumette, F. and Hutchinson, S. (2006). Visual servo control. i. basic approaches, *Robotics Automation Magazine, IEEE* **13**(4): 82–90.
- Cherubini, A., Chaumette, F. and Oriolo, G. (2008). An image-based visual servoing scheme for following paths with nonholonomic mobile robots, *Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2008*, Hanoi, Vietnam, France, pp. 108–113.
- Conceicao, A. G. S., Ribeiro, T., da Costa, A. L. and Santos, J. (2011). Sistema microprocessado para controle em tempo real de robôs móveis omnidirecionais, *Anais do X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1340–1345.
- Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer.
- Coulaud, J. B., Campion, G., Bastin, G. and Wan, M. D. (2006). Stability analysis of a vision-based control design for an autonomous mobile robot, *IEEE Transactions on Robotics* **22**(5): 1062–1069.
- de Lima, D. A. and Victorino, A. C. (2014). A visual servoing approach for road lane following with obstacle avoidance, *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, pp. 412–417.
- Delfín, J., Becerra, H. M. and Arechavaleta, G. (2014). Visual path following using a sequence of target images and smooth robot velocities for humanoid navigation, *Humanoid Robots (Humanoids), 2014 14th IEEE-RAS International Conference on*, pp. 354–359.
- Frezza, R., Soatto, S. and Picci, G. (1997). Visual path following by recursive spline updating, *Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on*, Vol. 2, pp. 1130–1134 vol.2.
- Leite, A. C. and Lizarralde, F. (2016). Passivity-based adaptive 3d visual servoing without depth and image velocity measurements for uncertain robot manipulators, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* pp. n/a–n/a.
- Mekonnen, G., Kumar, S. and Pathak, P. (2016). Wireless hybrid visual servoing of omnidirectional wheeled mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems* **75**, Part B: 450 – 462.
- Sabatta, D. (2014). A vision-based error metric for path following control.
- Samson, C. and Ait-Abderrahim, K. (1991). Mobile robot control part 1: Feedback control of a non-holonomic mobile robots, *Technical Report 1281*, INRIA.
- Soetanto, D., Lapierre, L. and Pascoal, A. (2003). Adaptive, non-singular path-following control of dynamic wheeled robots, *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, Vol. 2, pp. 1765–1770 Vol.2.
- Spellucci, P. (1998). An sqp method for general nonlinear programs using only equality constrained subproblems, *Mathematical Programming*, Vol. 82, pp. 413 – 448.

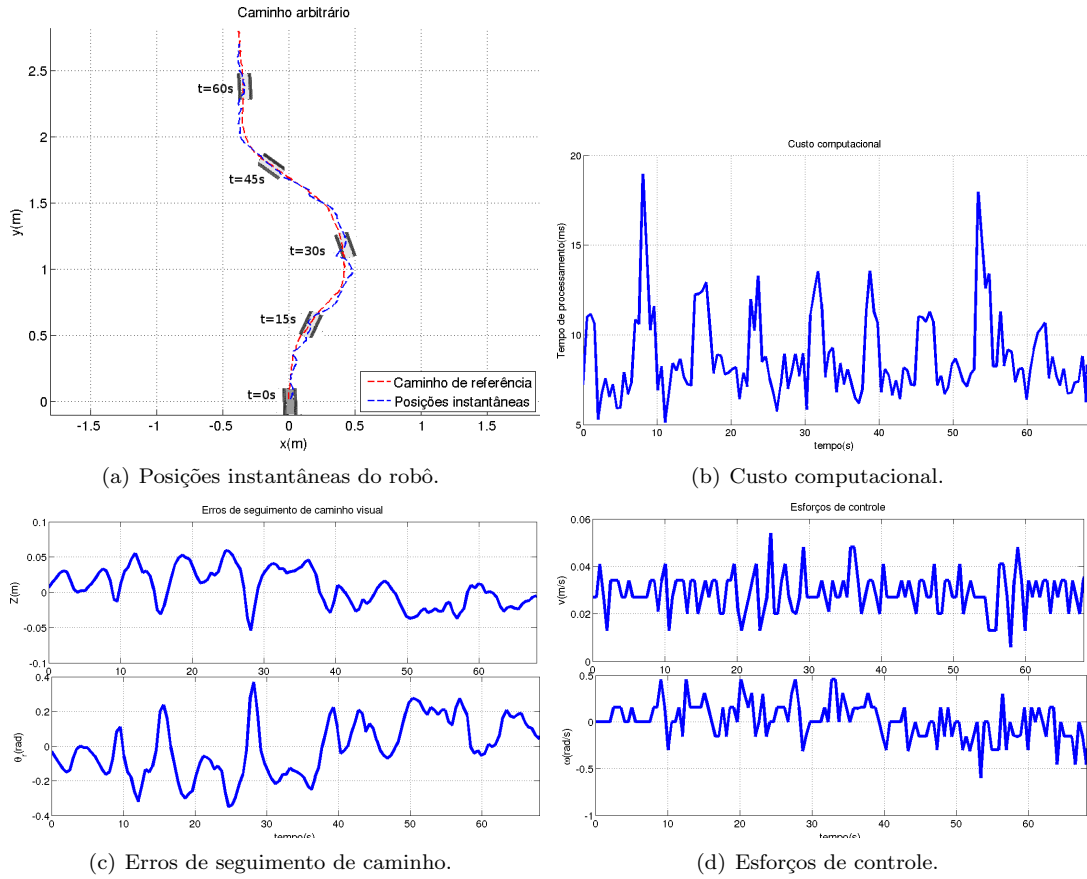


Figura 5: Seguimento de caminhos visuais - Caminho arbitrário - *NMPC*.

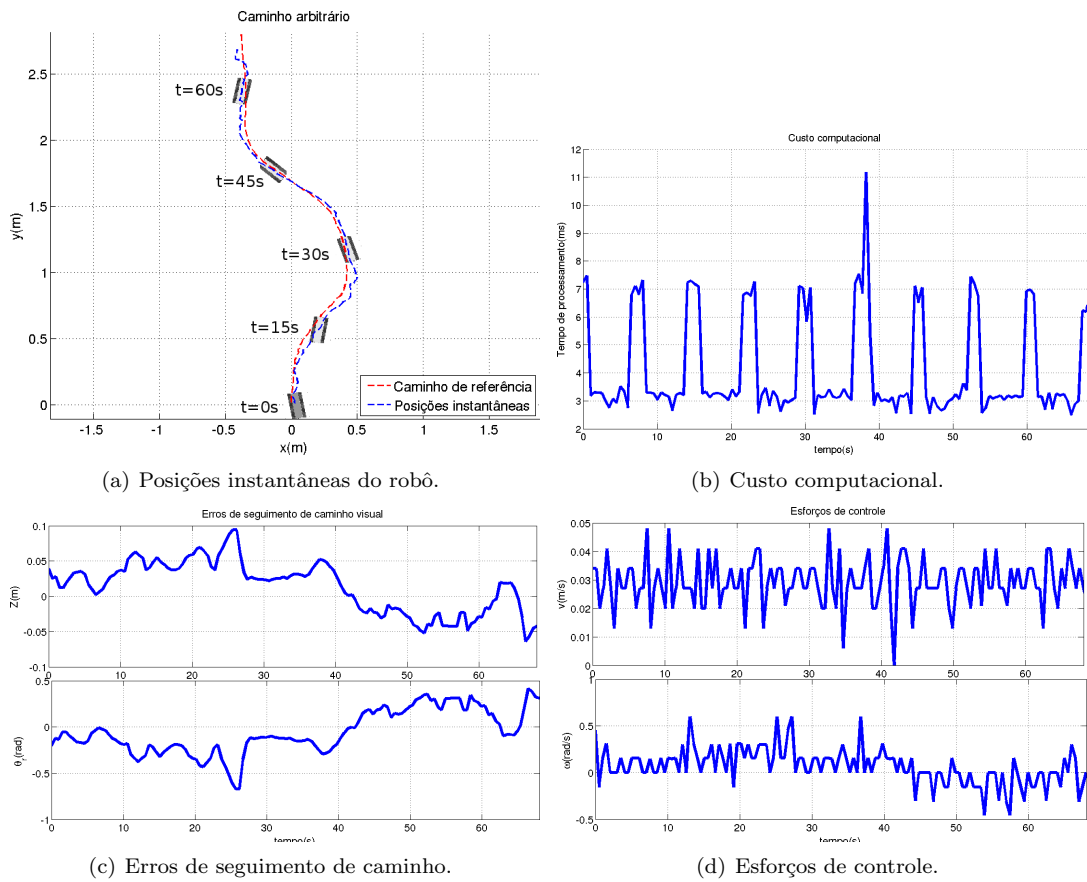


Figura 6: Seguimento de caminhos visuais - Caminho arbitrário - $\omega = KZ$.